

# A FUSÃO: Física de uma fonte de energia fundamental

As reacções de fusão libertam a energia que alimenta o sol e as estrelas. Para produzir esta energia, os plasmas de alta temperatura devem estar confinados durante um tempo suficientemente longo. Os resultados da investigação em física dos plasmas permitem recriar em laboratório as condições necessárias para a fusão termonuclear controlada. O objectivo a longo prazo é o aproveitamento energético, em complemento a outras fontes, para fazer face às necessidades futuras. Sobre um fundo representando o Sol e a Terra, o presente cartaz explora os diferentes temas relativos à fusão: as suas relações com outras formas de energia, a física das reacções de fusão, o confinamento e o aquecimento dos plasmas bem como o avanço da investigação neste domínio.

## Produção e transformação da energia.

A sociedade moderna assenta na disponibilidade de numerosas fontes de energia e na conversão dessa energia numa forma utilizável directamente. Nas centrais, a energia é produzida sob a forma de calor por reacções exotérmicas, quer recorram às reacções químicas, à fissão nuclear ou – no futuro – à fusão. Essa energia térmica é transformada em seguida por processos que obedecem às leis da termodinâmica. A eficácia desta conversão é limitada pela Segunda Lei da Termodinâmica: inevitavelmente, uma parte da energia e dos reagentes não pode ser recuperada, é libertada e perdida no meio ambiente. A energia gerada por quilo de reagente é muito maior para reacções nucleares do que para reacções químicas. No cenário mais provável para uma futura central de fusão termonuclear da primeira geração, a reacção utilizada será a fusão de deutério – extremamente abundante na terra – com trítio. Este pode ser produzido no próprio reactor, a partir de lítio. O lítio absorve os neutrões provenientes da reacção D+T e desintegra-se em trítio e hélio. Os verdadeiros reagentes serão pois o deutério e o lítio. O produto da reacção é o hélio.

## Produção da energia por reacções de fusão.

A equação  $\Delta E = (m_i - m_f)c^2$  relaciona a energia libertada  $\Delta E$  com a diferença de massa entre os reagentes ( $m_i$ ) e os produtos da reacção ( $m_f$ ). A energia de ligação de um núcleo corresponde à diferença entre a massa do núcleo e a soma das massas dos nucleões (protões e neutrões) que o constituem. A forma do gráfico que representa a energia de ligação por nucleão mostra que combinando (processo de fusão) os elementos com massa pequena, obtem-se um núcleo com energia de ligação por nucleão mais elevado; liberta-se assim energia. Para os elementos mais pesados (acima de uma massa de cerca de 62 nucleões), a divisão do núcleo em elementos mais leves (fissão) permite também libertar energia. Atendendo a que o declive da curva é maior para o caso da fusão, a energia libertada por nucleão é mais importante do que na fissão. Mostram-se esquematicamente as características de dois processos de fusão importantes: o ciclo protão-protão, que é a fonte primária de energia do sol, e a reacção D-T que será utilizada nos reactores de fusão da primeira geração. A taxa das reacções depende

fortemente da temperatura iónica. Para que a atracção de origem nuclear, muito forte mas de curto raio de acção, se sobreponha à repulsão dos núcleos carregados electricamente (ambos positivamente), os núcleos devem aproximar-se pelo menos de  $10^{-15}$  m. Este facto explica a necessidade de se obter as temperaturas muito altas indicadas no gráfico. A diferença entre as taxas de reacção dos dois processos considerados explica também o porquê da preferência da reacção D-T, em relação ao ciclo protão-protão, nas aplicações terrestres.

## O Plasma, quarto estado da matéria.

Os plasmas, conjuntos de partículas livres carregadas electricamente, existem naturalmente no universo e são também produzidos pelo homem, englobando domínios de densidade e de temperatura extraordinariamente vastos. A física dos plasmas é a pedra angular do nosso conhecimento do Sol e das estrelas, do meio interestelar, das galáxias, dos anúncios luminosos de néon, dos relâmpagos e auroras boreais, bem como, certamente, das reacções de fusão controlada. Os plasmas são governados pelas interacções eléctricas de longo alcance entre os seus iões e electrões, e pelos campos magnéticos, externos ou criados por correntes eléctricas internas. A dinâmica de tais sistemas é complexa e deve ser bem compreendida para permitir o desenvolvimento da energia de fusão.

## As condições requeridas para a fusão controlada.

É ainda necessário aperfeiçoar as técnicas de aquecimento e de confinamento dos plasmas para fazer da fusão controlada uma fonte de energia utilizável. No caso do plasma D-T, que deve atingir temperaturas da ordem de  $10^8$  K, os dois métodos de confinamento mais promissores são a via magnética e a via inercial. O Tokamak é um dispositivo toroidal compreendendo uma câmara de vácuo oca, em forma de anel, no interior da qual existe um campo magnético helicoidal. É um exemplo da primeira técnica: o confinamento magnético. Na via inercial, uma minúscula cápsula de vidro, que contém a mistura D-T, é comprimida por feixes de iões ou de lasers muito intensos para obter densidades e temperaturas extremamente elevadas; obtem-se assim um número suficiente de reacções de fusão durante o tempo muito curto durante o qual essa cápsula em implosão se mantém confinada sob o efeito da sua própria inércia. Para atingir a fusão controlada, um plasma com alta temperatura deve ser confinado a alta densidade durante um tempo suficientemente longo. Este critério é expresso em termos da qualidade do confinamento: o produto da densidade do plasma pelo tempo de confinamento da energia. As experiências mais avançadas já produziram plasmas nos quais a densidade, a temperatura ou o tempo de confinamento da energia se aproximaram (e até ultrapassaram) os valores requeridos para obter reacções de fusão auto-sustentadas; no entanto, os valores desejados não foram ainda obtidos simultaneamente de forma a garantir o critério expresso pelo produto dos três parâmetros.

## Informações complementares, informações recentes, e material educativo na Internet (World Wide Web).

**Fusion Education Project Home Page:** <http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>  
**CPEP Home Page:** <http://pdg.lbl.gov/cpep.html>  
**CPEP Product Information:** [http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep\\_how\\_to\\_order.html](http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html)

**CFN/IST Lisboa Homepage** <http://www.cfn.ist.utl.pt/>

**TEC-Homepages**  
FZJ/IPP: <http://www.fz-juelich.de/ipp/>  
ERM-KMS Bruxelles: <http://fusion.rma.ac.be/>  
FOM Rijnhuizen: <http://www.rijnh.nl/>

Estas páginas remetem igualmente para diferentes instituições e organismos activos no domínio da investigação sobre fusão controlada.

---

O “**Contemporary Physics Education Project**” (CPEP) é uma associação sem fins lucrativos de físicos, educadores e professores. O seu material educativo dá visibilidade aos conhecimentos científicos actuais, sublinhando as descobertas importantes dos últimos trinta anos. O CPEP apoia também diversos laboratórios para professores. Outras informações podem ser obtidas por correio electrónico (e-mail) com o seguinte endereço: [pdg@lbl.gov](mailto:pdg@lbl.gov) ou via internet para o endereço acima indicado. O material disponibilizado pelo CPEP pode ser encomendado para o **Science Kit**, 777 East Park Drive, Tonawanda, NY 14150 USA, Telefax +1-716-874-9572.

O **Centro de Fusão Nuclear (CFN)** é uma unidade de investigação do Instituto Superior Técnico (IST), a maior escola de engenharia portuguesa (com cerca de 9000 alunos e 1200 professores), sediada em Lisboa. No CFN trabalham cerca de 65 pessoas, sendo a sua tarefa principal a investigação em plasmas de fusão, no âmbito do Contracto de Associação entre o IST e a “European Atomic Energy Community” (EURATOM). O Centro dispõe do Tokamak IST-TOK para estudos experimentais e apresenta actualmente as seguintes linhas de I&D: (i) Física Experimental; (ii) Reflectometria de micro-ondas; (iii) Controle e Aquisição de Dados; (iv) Geração não-inductiva de corrente; (v) Transporte e actividade magnetohidrodinâmica (MHD) e (vi) Confinamento inercial. Informações detalhadas sobre o CFN e exemplares deste poster (em português) podem ser solicitados para **Centro de Fusão Nuclear / Instituto Superior Técnico**, Av. Rovisco Pais 1, 1096 Lisboa Codex, Portugal.

O “**Trilateral Euregio Cluster**” (TEC) é uma associação de instituições de investigação nacionais da Bélgica, Holanda e República Federal da Alemanha: o Laboratoire de Physique des Plasmas - Laboratorium voor Plasmafysica de l'École Royale Militaire - Koninklijke Militaire School (ERM-KMS) em Bruxelas; o FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen em Nieuwegein; e o Institut für Plasmaphysik do centro de investigação de Jülich. Exemplares deste cartaz (em francês, holandês, alemão, português, espanhol ou italiano) podem ser obtidos junto do **Institut für Plasmaphysik**, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Telefax +49-2461-615452.